بررسی بدتر شدن شکاف تونل کامبرلند

رادار نفوذ کننده در زمین و آزمایش آب کمک می‌کنند تا بتوان دلایل نشست کف تونل کنتاکی-تنسی را مشخص کرد.

Roger Roberts, Ph.D; Gabriel Dadi, Ph.D, P.E, LEED AP; and Clark

Graves, Ph.D.

فقط چند سال پس از افتتاح تونل Cumberland Gap - یک تونل کوهستانی که کنتاکی (از ایالت‌های جنوبی آمریکا) و تنسی (یکی از ایالت‌های جنوبی آمریکا) را به هم متصل می‌کند- افسران بزرگراه متوجه نشست متوسط رو به شدید US ۲۵E تنسی در سراسر روسازی مسلح بتنی با حفره‌های زیاد موجود در زیر روسازی شدند.

مرکز حمل و نقل کنتاکی یک تیم تحقیقاتی را به‌منظور یافتن علل ریشه‌ای مشکلات نشست با استفاده از رادار نفوذ کننده در زمین (GPR) و آزمایش هیدرو ژئوشیمیایی آب (HGWT)، بکار گرفت.

شکل یک. جریان داخلی آب‌های زیر زمین در منطقه‌ای در سال ۲۰۰۷ تعمیر شده بود

استفاده از تجهیزات GPR، تولید شده توسط Geophysical Survey Systems، شرکت (GSSI)، اطلاعاتی را فراهم می‌کند که با نشان دادن دقیق‌تر محل‌هایی که تعمیر در آن‌ها نیاز است، هزینه‌ها برای پروژه‌ی تعمیر تونل را کم می‌کند. تجهیزات، در حال حاضر بخش جدایی ناپذیری در روند بازرسی بلند مدت است که در پیدا کردن دیگر مناطق فرسوده در تونل که در آینده به وجود می‌آیند، کمک خواهد کرد.

تونلCumberland Gap یک تونل کوهستانی دو دهانه در کوهستان‌های آپالاچی است که در سراسر دهانه کامبرلند خوش منظره امتداد دارد (اولین دروازه بزرگ به سمت غرب).

این تونل که در سال ۱۹۹۶ با هزینه‌ای حدوود ۲۶۰ میلیون دلار ساخته شده در پارک ملی تاریخی Gap کامبرلند در مسیر ایالت کنتاکی-تنسی واقع شده است. یک جاده دو خط قابل دسترس، باریک، پرپیچ و خم و تقریباً خطرناک به بالا و روی کوه‌ها می‌رود و دولت جهت بهبود ایمنی ترافیک، بدون تداخل با منظره، تصمیم گرفت تا تونل چهار خطی را در سرتاسر پارک و کوه بسازد.

این تونل که در حدود ۱۰۰۰ فوت زیر قله واقع شده، روزانه حدود ۲۲۵۰۰ اتومبیل دو جهت را حمل می‌کند. حدود ۱۰ درصد از ترافیک عبوری را، کامیون‌ها تشکیل می‌دهند که عمدتاً زغال سنگ را از معادن کنتاکی، به تنسی جهت سوخت‌گیری نیروگاه برق آنجا، منتقل می‌کنند.

چهار سال بیشتر از افتتاح تونل نگذشته بود که مقامات بزرگراه متوجه یک منطقه مسکونی و یک پایین عمدگی عجیب پیاده‌رو شدند. پیاده‌روهای بتنی مسلح با فولاد، در مناطق مختلف شمال و مرز جنوبی تونل مستقر شده‌اند.۱۰ سال پس از اتمام تونل، حدود ۷۴۰۰ فوت مربع از سطح کل پیاده‌رو، حفره‌هایی از زیر به عمق بین ۰٫۵ تا ۴۰ اینچ داشتند. فقط فولاد تقویتی پیاده‌رو را از واژگون شدن، باز می‌داشت.

شکل دو. حفره با چهل اینچ عمق در زیر روسازی بتنی

منبع: مشکلات فرورفتگی آسفالت و نتایج تست آب هیدروژئوشیمیایی برای تونل شکافدار کامبرلند، مارس ۲۰۱۰

بررسی و کاوش علت حفره‌ها:

دولت، تلاش‌های زیادی برای تقویت و محکم کردن مناطق پیاده‌رو مسکونی قبل از شروع تعمیرات تحقیقاتی در سال ۲۰۰۷ کرد و در سال ۲۰۰۷ اقدام به تعمیر بخش‌های بیشتر تخریب شده کرد و به علل ریشه‌ای مسائل پرداخت.

این تلاش‌ها توسط دانشگاه کنتاکی، کالج مهندسی، مرکز حمل و نقل کنتاکی، رهبری شده بود. این مرکز جهت انجام کارهای تحقیقاتی کابینه حمل و نقل کنتاکی برای بزرگراه‌ها، جاده‌ها و پل‌ها، قرارداد بسته است.

با رهبری براد ریستر، مهندس ارشد تحقیق، پژوهش با تحلیل تأثیر اقتصادی روی سفر عمومی، در شرایطی که پیاده‌رو، رو به شکست باشد و تونل بسته شود، آغاز شد. مطالعات نشان داد که اگر از این پس قادر به حمل و نقل زغال از طریق تونل نباشند و مجبور به پیدا کردن یک مسیر جایگزین باشند، آنگاه یک انحراف چهار ساعته خواهند داشت. هزینه‌های مصرف کننده برای این انحراف، به همراه هزینه‌های مربوط به تأخیرها، برای مردمی که در کنتاکی زندگی می‌کنند جز آن‌هایی که جهت کار به تنسی رفت و آمد می‌کنند، به روزانه ۱٫۱ میلیون دلار رسید.

بر اساس تأثیر زیاد آن روی اقتصاد، دولت تصمیم به یافتن راهی برای تعمیر دائمی مشکل کرد. اول از همه، آن‌ها می‌بایست حفره‌ها را مکان‌یابی کنند و تعیین کنند که چرا پیاده‌رو بتنی در سطوح مختلف تونل مقرر شده است. به‌منظور انجام این کار، تیم تحقیقاتی، بررسی و مکان‌یابی GPR و HGWTرا انجام دادند.

تونل با لایه‌ی ۴-۶ فوتی از مواد زیر سازی سنگ آهک خرد شده، قرار داده شده در زیر پیاده‌رو بتنی، ساخته شده است. به‌واسطه‌ی طراحی، هر روزه ۵۰۰۰۰۰ تا ۱,۲ میلیون گالن آب‌های زیر زمینی در زیر تونل، از میان لایه‌ی ۴-۶ فوتی سنگ آهک خردشده، جریان می‌یابد. آزمایشات HGWT نشان داد که جریان آب زیرزمینی در مناطق مشخصی، نسبت به کلسیت فعال و واکنش پذیر است، بنابراین زیرسازی سنگ آهک غنی شده از کلسیم، تجزیه می‌شد و هر روز از طریق سیستم جمع آوری آب‌های زیرزمینی، از تونل خارج می‌شد.

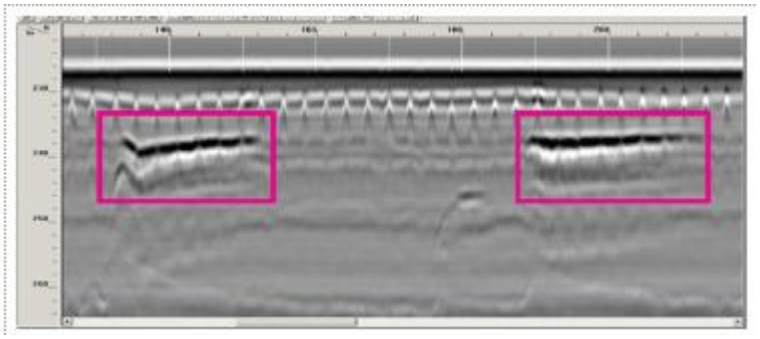
تست‌های آزمایشگاهی تائید کرد که نمونه آب با کمبود کلسیم کمتر از ۰,۱۰، شروع به حل و تجزیه مواد سنگ آهک می‌کنند. مقداری از آب‌های زیرزمینی وارد شده به تونل، رواناب حاصل از شکاف‌های زغال سنگ بودند. آب عبوری از زغال سنگ، خواص شیمیایی آن را تغییر می‌دهد و اسیدی‌تر می‌شود. نتایج آزمایش نشان داد که ماهانه حدود ۰,۷۵ تا ۱,۵ یارد مکعب از مواد زیرسازی سنگ آهک، به خاطر کمبود کلسیم آب زیر آن، از تونل جدا می‌شدند.

ریستر گفت: «هر روز به ازای عبور یک چرخ دستی، نیمی از مواد تونل در محلول، جداشده، حل می‌شوند و طی زهکشی شسته می‌شوند.»

این منجر به باز شدن ۷۰ الی ۱۵۰ فوت مربع از سطح حفره جدید در زیر پیاده‌رو بتنی، در هر ماه می‌شود.

این تیم، سپس از تکنولوژی GPR، توسعه یافته توسط GSSI، جهت شناسایی مکان و اندازه حفرات یا گودال‌ها استفاده کرد. تجهیزات، SIR-۲۰ و SIR-۳۰۰۰، دستگاه‌ها را با یک آنتن ۹۰۰ مگاهرتز کنترل می‌کند و چرخ نقشه برداری برای اسکن از یک انتهای تونل به طرف دیگر در هر دو تونل‌ها، روی خط مرکزی دو فوتی، استفاده می‌شد. در ابتدا، آن‌ها آنتن را با راه رفتن کشیده، اما هنگامی که با تجربه‌تر شدند، تجهیزات را به یک اتومبیل وصل کردند. هر طرف از تونل ۴۶۰۰ متری حدود چهار تا پنج ساعت برای اسکن طول می‌کشد، یا حدود ۱۰ ساعت در کل.

اولین حفره‌ای که پیدا کردند، ۴ فوت عمق و ۳۰ فوت طول داشت. بعضی از مناطق سوراخ دار، در طول هر دو خط امتداد داشتند و ۱ تا ۷۰ فوت در طول، ادامه داشتند. شکل ۲ یک حفره با عمق ۴۰ اینچ واقع شده در زیر خط رانندگی چپ تونل مرز جنوبی را نشان می‌دهد.



شکل ۳. نقشه برداری GPR، حفره‌های متعدد در زیر بتن در تونل مرز شمالی را نشان داد.

منبع: بررسی ژئوفیزیکی سیستم، شرکت (GSSI)

ریستر گفت: «روسازی بتنی، اساساً به‌عنوان یک پل، در این مکان‌های حفره‌دار عمل می‌کند.» محاسبات بارگذاری سازه نشان می‌دهد که اگر یک دال بتنی به‌عنوان یک پل طراحی شود، تنها قادراست ۶ فوت قبل از شروع به شکست پابرجا بماند. تنها دلیلی که از فروریزی کامل پیاده‌رو جلوگیری کرده است، میلگردهای تقویتی است که داخل بتن جای گرفته‌اند.

باتوجه به ریستر، تجهیزات GPR قادر بود تا تعیین کند که مشکلات کجا بودند و به تیم راهی ارائه دهد که ادامه دهند تا مشکل را پیگیری کنند. آن‌ها در ابتدا، برای انجام اسکن و بررسی‌ها، هر شش ماه برای شناسایی مناطق که در آن حفره جدید ظاهرمی شدند، شروع به استفاده

از تکنولوژی GPR در سال ۲۰۰۲ کردند. تعمیرات هزینه بر و موقتی انجام شده بود که شامل حفر یک گودال و پر سازی آن‌ها با بتن جهت محکم کردن سازه بود.

ریستر گفت: «تجهیزات GPR تصویری از اینکه مشکلات کجا اتفاق افتاده بودند به ما ارائه داد.» این منطقه آن‌قدر بزرگ است که من نمی‌دانم چه کار دیگری می‌توانستیم انجام دهیم تا به تصویر ببینیم که مشکلات کجا بودند.

به‌عنوان مثال، شکل ۳ نشان می‌دهد که چگونه GPR حضور حفره‌های متعدد در زیرروسازی بتن در تونل مرز شمالی را نشان داد. شکل ۴ تجهیزات GPR را در عمل نشان می‌دهد.

مطالعات مشخصات کرد که بهترین استراتژی اصلاح، حذف مواد زیرسازی آهکی موجود و جایگزینی آن با لایه‌هایی از گرانیت خرد شده، جدا شده توسط ژئوگرید فابریک و روسازی جدید ۱۰ اینچی بتن مسلح بود. گرانیت بی اثر است و تحت تأثیر آب با PH پایین، قرار نمی‌گیرد.

ریستر گفت: کوهی که از میان آن تونل عبور می‌کند، حاصل نوعی رانش (در این نوه رانش لایه‌های سنگی زیرین به روی لایه فوقانی رانده می‌شوند) در زمین است که لایه‌های زیرین از سنگ آهک هستند و روی آن‌ها یک لایه از ماسه سنگ و بعد از آن سنگ‌های طبیعی قرار دارند. در تنسی، آب درون سنگ آهک جریان می‌یابد، در حالی که آبی که از کنتاکی می‌آید از سنگ‌های طبیعی جریان می‌یابد، بنابراین عناصر کلسیم ندارد. آب‌های زیرزمینی بدون کلسیم برای خنثی سازی اسیدی بود که سبب حل شدن سنگ آهک درون تونل می‌شد.

ریستر گفت: «تائید ساختار زمین‌شناسی این اطمینان را بما داد که هیچ حفره‌ای نبود که نیاز به تعمیر در یک انتهای تونل داشته باشد که این به‌طور قابل توجهی کاهش هزینه‌های تعمیر ر ا درپی دارد.»

طرح اولیه، تعویض حدود ۲۸۰۰ فوت از پیاده‌رو در هر تونل، با هزینه تقریبی ۱۰ میلیون دلار بود. با این حال، GPR و نتایج HGWT به خدمه‌ها اجازه می‌دهد تا تعمیرات در مناطق دورافتاده را محدود کنند و به مقدار قابل توجهی صرفه جویی کنند. پروژه تکمیل شده در سال ۲۰۱۲، حدود ۳ میلیون دلار هزینه برداشت. این پروژه به مدت ۳۵ روز، با کار ۲۴ ساعته در روز طول کشید.

جهت استمرار و توالی تعمیر و نگهداری روزمره تونل، با GPR اسکن‌هایی هر شش ماه انجام گرفت. تجهیزات یک جزء کلیدی از یک فرایند بازرسی بلندمدت است که در پیدا کردن دیگر مناطق بحرانی در تونل، در صورتی که در آینده رخ دهند، کمک خواهد کرد.

شکل چهار: تجهیزات GPR مورد استفاده برای اسکن تونل Gap کامبرلند.

منبع: دانشگاه کنتاکی، KTC

این پروژه برای گنجاندن در چکیده تحقیقات با ارزش انجمن آمریکایی بزرگراه ایالت و مقامات حمل و نقل ۲۰۱۲ انتخاب شده بود.

ضریب پژوهش: بهتر- ارزان‌تر- سریع‌تر. همچنین در بروشور اجرایی برنامه ملی تحقیقات تعاونی بزرگراه برجسته بود، تحقیقات، ۲۰۱۲ متفاوتی را ایجاد می‌کند.

با توجه به ریستر که گروهش کارهای کالبد شناسی روی شکست پل، تونل‌ها و جاده انجام می‌داد،GPR یک ابزار مهم در دسترس برای به دست آوردن اطلاعات قابل تشخیص است که یک درکی از این که آیا مشکل از چاه فاضلاب است یا فرورفتگی روسازی ارائه دهد و اینکه آیا علت آب به دام افتاده در زیر جاده است یا خیر.

ریسترگفت: موفقیت ما به استفاده از GPR برمی‌گردد. «بدون آن ما توانایی به تصویر کشیدن آنچه که در زیر سطح اتفاق می‌افتد را نداشتیم.»

دکتر راجر رابرتز، مهندس ارشد نرم‌افزار برای شرکت سیستم‌های نقشه برداری ژئوفیزیکی (GSSI; geophysical.com) با بیش از ۲۰ سال تجربه با GSSI است. تخصص او استفاده از رادار نافذ زمین برای برنامه‌های کاربردی زیرساختی حمل و نقل می‌باشد، از جمله بازرسی عرشه پل، جاده و تحلیل پیاده‌رو و همبستگی داده‌های تجهیزات آزمون غیر مخرب.

گابریل دادی، با مدرک دکترا،.LEED AP P.E، استادیار مهندسی عمران در دانشگاه کنتاکی، دانشکده مهندسی است. او واحدهای درسی کارشناسی و کارشناسی ارشد در مهندسی ساخت‌وساز و مدیریت پروژه را تدریس می‌کند و به‌عنوان یک محقق در پروژه‌های تحقیقاتی متعددی در زمینه فن‌آوری اطلاعات ساخت‌وساز و مشکلات نیروی کار خدمت کرده است. پیش از این، او به‌عنوان یک مهندس پروژه در چندین پروژه ساخت‌وساز تجاری پیچیده سراسر کنتاکی کار کرده است.

کلارک گریوز، با مدرک دکترا، دستیار مدیر مرکز حمل و نقل کنتاکی در لکسینگتون، KY است.